

부유식 OWC 챔버의 파중 운동해석

홍도천*

*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

A Study on the Floating OWC Chamber Motion in Waves

DO-CHUN HONG*

*Ocean Development System Laboratory, KORDI, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Floating Body Motion in Waves 과 중 부유체 운동, OWC : Oscillating Water Column 진동수주, Free Surface Oscillating Pressure Patch 자유표면 변동압력면, Matched Green Integral Equation 정합 그린 적분방정식, Rankine-Kelvin Green Function 랭킨 및 켈빈형 그린함수, Wave Energy Absorption 파 에너지 흡수

ABSTRACT: The motion of a floating OWC chamber in waves is studied taking account of fluctuating air pressure in the air chamber. An atmospheric pressure drop occurs across the upper opening of the chamber which causes not only hydrodynamic but also pneumatic added mass and damping forces to the floating chamber. A velocity potential in the water due to the free surface oscillating pressure patch is added to the conventional radiation-diffraction potential problem. The potential problem inside the chamber is formulated by making use of the Green integral equation associated with the Rankine Green function while the outer problem with the Kelvin Green function. The two integral equations are solved simultaneously by making use of a matching boundary condition at the lower opening of the chamber to the outer water region. The chamber motion in the frequency domain is calculated for various values of parameters related to the atmospheric pressure drop. The present methods can also be used for the analysis of air-cushion vehicle motion as well as for the design of a floating OWC wave energy absorber.

1. 서 론

가동물체에 의한 파 에너지 흡수 관련 연구는 1970년대 석유 파동 이후 활발히 전개되어 선형과 이론에 근거한 기본적 연구가 수행된 바 있다(Budal and Falnes, 1975; Evans, 1976; Newman, 1976; Guevel and Hong, 1982). 한편 파 중에 위치한 챔버 내부의 진동수주(OWC)에 의한 파 에너지 흡수에는 진동수주 상부에 위치한 공기실의 기압과 챔버 내부 자유표면 유동이 서로 연계되어 있으므로 가동물체에 대한 이론을 직접 사용하기 곤란하나 공기실 압력에 의한 자유표면 교란을 자유표면 변동압력면(free surface oscillating pressure patch)으로 다룬 "진동수주에 의한 파 에너지 흡수 이론"의 개발, 도입에 의하여 기본 이론이 정립된 바 있다(Ogilvie, 1969; Falcão and Sarmiento, 1980; Evans, 1982; Falnes and McIver, 1985). 본 논문에서는 이와 같이 정립된 이론을 사용하여 구조물 내부에 파력흡수용 및 운동감쇠용 OWC 챔버가 각각 설치된 3차원 부유체의 운동해석 방법 및 수치실험에 대하여 소개하였다.

2. 문제의 정식화

유체는 비점성, 비압축성이고 자유표면 F 와 부유체의 접수

면 S 그리고 무한수심 사이의 구간 V 를 접하며 여기에 중력이 작용하고 있다. (x, y) 평면을 정수면과 일치시킨 오른손 직각좌표계 (x, y, z) 에서 원점 0 가 평균위치에 있는 부유체의 수선면에 있고 z 축은 연직상방을 가리킨다. 유동을 비회전이라 하면 유속은 Laplace방정식을 만족시키는 속도포텐셜로부터 구할 수 있다. 크기가 $O(\epsilon)$ 인 미소진폭 a_0 , 원 진동수 ω 를 가지며 속도포텐셜 ϕ_0 로 정의되는 입사파(Airy wave)가 무한원방에서 온다.

$$\phi_0 = \text{Re}\{\phi_0 e^{-i\omega t}\} \tag{1}$$

$$\phi_0 = -\frac{a_0 g}{\omega} e^{k_0[z + i(x \cos \beta + y \sin \beta)]} \tag{2}$$

여기서 g 는 중력가속도, $k_0 = \omega^2/g$ 는 파수이고 β 는 x 축으로부터 켄 파의 입사각이다.

부유체는 입사파에 의하여 기진되어 원진동수 ω 로 $O(\epsilon)$ 인 미소진폭 단순조화운동을 한다. S 상에서 V 를 향한 법선 벡터를 \vec{n} , 평균위치에서의 S 및 \vec{n} 을 S_0 , \vec{n}_0 라하고 S_0 와 평면 $z=0$ 가 만나는 선을 평균위치에 있는 부유체의 홀수선(Waterline) W 라 한다. 한편 부유체의 6자유도 운동에 의한 S 상의 1점 M 의 운동변위는 그 평균위치 M_0 와 순간위치 M_1 간의 거리를 사용하여 다음과 같이 표시된다.

제1저자 홍도천 연락처: 대전광역시 유성구 장동 171
042-868-7588 dchong@kriso.re.kr

$$\vec{A}(M_0) = \vec{M}_0 \vec{M}_1 = \vec{a} + \vec{\theta} \times \vec{OM}_0 \quad (3)$$

여기서

$$\begin{aligned} \vec{a} &= a_1 \vec{e}_1 + a_2 \vec{e}_2 + a_3 \vec{e}_3 \\ \vec{\theta} &= a_4 \vec{e}_1 + a_5 \vec{e}_2 + a_6 \vec{e}_3 \end{aligned} \quad (4)$$

$$a_j = \text{Re}\{ a_j e^{-i\omega t} \}, \quad j=1, \dots, 6 \quad (5)$$

입사와 포텐셜 ϕ_0 는 주어졌으므로 부유체의 존재에 기인한 산란파와 Ψ_7 및 부유체의 6자유도 운동에 의한 방사와 Ψ_R 을 구하는 것이 문제의 핵심이 되며 비정상 유동의 전체 포텐셜 Ψ 는 이들의 합이다.

$$\Psi = \phi_0 + \Psi_7 + \Psi_R \quad (6)$$

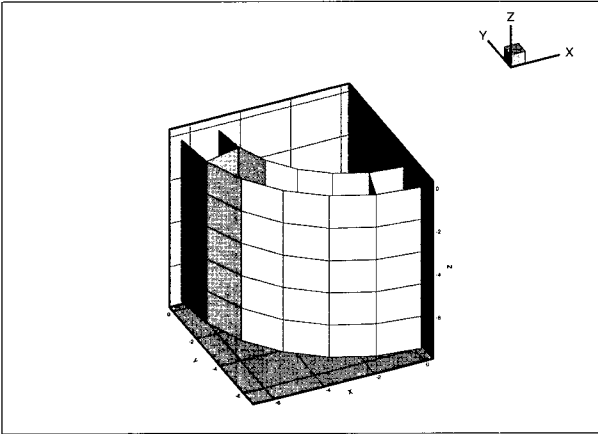


Fig. 1 OWC chamber configuration (1/4 is discretized)

부유체가 내부 자유표면이 없는 강체로 구성되어있는 경우, 산란파 및 방사와 포텐셜을 구하는 문제는 3차원 방사파-산란과 문제로 잘 알려져 있다(홍도천 등, 1987). 그러나 원형 굴뚝형 부유체로서 Fig. 1에 보인 바와 같이 중앙에 파력흡수용 주 챔버가 있고 굴뚝 둘레에 부력실이 있으며 부력실의 일부가 다시 분할되어 좌우 및 전후로 대칭인 횡요 및 중요 감쇠챔버화된 경우에는 부록에 소개한 바와 같이 선형이론의 범위 내에서 각 챔버 내부의 자유표면 변동압력면(free surface oscillating pressure patch)에 기인한 속도포텐셜을 도입하여야 한다. 그림에는 접수면만 표시되었으나 부력실이 분할된 것이 보이며 수직면 ($y0z$) 및 ($z0x$)가 대칭면이고 주 챔버와 횡요 및 중요 감쇠챔버의 상부 공기실에는 각각 덕트가 있어 이곳을 통과하는 기류의 압력감소를 초래한다(Hong et al., 1995).

이론의 전개를 위하여 자유표면 F 의 평균위치인 수평면 $z=0$ 을 F_0 라하고 이를 $F_0 = F_0^c \cup F_0^i$, $F_0^i = F_0^1 \cup F_0^2 \cup F_0^3$ 와 같이 구분한다. 여기서 F_0^c 는 부유체 외부의 수평면이고 F_0^i 는 주 챔버와 횡요 및 중요 감쇠챔버 내부수평면 F_0^1 , F_0^2 , F_0^3 의 합이다.

부유식 OWC 챔버에 의하여 교란된 유동을 나타내는 포텐셜 Ψ_R 및 Ψ_7 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi_7 = \phi_7 + \sum_{l=1}^3 C_l^7 \phi_l^7 \quad (7)$$

$$\Psi_R = -i\omega \left\{ \sum_{k=1,2,6} a_k \phi_k + \sum_{k=3,4,5} a_k [\phi_k + \sum_{l=1}^3 C_l^k \phi_l^k] \right\} \quad (8)$$

여기서 ϕ_k ($k=1, \dots, 7$)는 기존의 방사-산란파 포텐셜이며 무한원방 방사조건을 만족시키고 자유표면 F_0 및 접수면 S_0 에서 각각 다음과 같은 경계조건을 만족시킨다.

$$\left(-k_0 + \frac{\partial}{\partial z}\right) \phi_k = 0 \quad \text{for } k=1, \dots, 7 \quad \text{on } F_0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial n_0} = \vec{e}_k \cdot \vec{n}_0 \quad \text{for } k=1, 2, 3 \quad \text{on } S_0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial n_0} = (\vec{e}_{k-3} \times \vec{OM}) \cdot \vec{n}_0 \quad \text{for } k=4, 5, 6, \quad \text{on } S_0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial n_0} = -\frac{\partial \phi_0}{\partial n_0} \quad \text{for } k=7 \quad \text{on } S_0 \quad (12)$$

한편 ϕ_k^l ($k=3, 4, 5, 7$ and $l=1, 2, 3$)은 주 챔버와 횡요 및 중요 감쇠챔버를 각각 윗첨자 ($l=1, 2, 3$)으로 표시한 챔버 내부 자유표면 변동압력면(free surface oscillating pressure patch)에 기인한 속도포텐셜이며 각각 다음과 같은 물리적 의미를 나타낸다.

ϕ_3^1 : 구조물의 상하동요에 의하여 생성된 주 챔버 변동압력면에 기인한 속도포텐셜

ϕ_3^2 : 구조물의 상하동요에 의하여 생성된 횡요 감쇠챔버 변동압력면에 기인한 속도포텐셜

ϕ_3^3 : 구조물의 상하동요에 의하여 생성된 중요 감쇠챔버 변동압력면에 기인한 속도포텐셜

ϕ_4^1 : 구조물의 횡요에 의하여 생성된 주 챔버 변동압력면에 기인한 속도포텐셜

ϕ_4^2 : 구조물의 횡요에 의하여 생성된 횡요 감쇠챔버 변동압력면에 기인한 속도포텐셜

ϕ_4^3 : 구조물의 횡요에 의하여 생성된 중요 감쇠챔버 변동압력면에 기인한 속도포텐셜

ϕ_5^1 : 구조물의 중요에 의하여 생성된 주 챔버 변동압력면에 기인한 속도포텐셜

ϕ_5^2 : 구조물의 중요에 의하여 생성된 횡요 감쇠챔버 변동압력면에 기인한 속도포텐셜

ϕ_5^3 : 구조물의 중요에 의하여 생성된 중요 감쇠챔버 변동압력면에 기인한 속도포텐셜

ϕ_7^1 : 구조물의 산란에 의하여 생성된 주 챔버 변동압력면에 기인한 속도포텐셜

ϕ_7^2 : 구조물의 산란에 의하여 생성된 횡요 감쇠챔버 변동압력면에 기인한 속도포텐셜

ϕ_7^3 : 구조물의 산란에 의하여 생성된 중요 감쇠챔버의 변동압력면에 기인한 속도포텐셜

C_k^l ($k=3,4,5,7$ and $l=1,2,3$) 은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_3^l = \frac{\gamma^l(q_3^l - A_C^l/A_d^l)}{(1 - \gamma^l Q_3^l)}, \quad l=1,2,3 \quad (13)$$

$$C_4^l = \frac{\gamma^l(q_4^l - \frac{1}{A_d^l} \int_{A_c^l} y ds)}{(1 - \gamma^l Q_4^l)}, \quad l=1,2,3 \quad (14)$$

$$C_5^l = \frac{\gamma^l(q_5^l + \frac{1}{A_d^l} \int_{A_c^l} x ds)}{(1 - \gamma^l Q_5^l)}, \quad l=1,2,3 \quad (15)$$

$$C_7^l = \frac{\gamma^l(q_0^l + q_7^l)}{(1 - \gamma^l Q_7^l)}, \quad l=1,2,3 \quad (16)$$

여기서 A_C^l 는 주 챔버 내부 수선면 S_C^l 의 면적이고 A_d^l ($l=2,3$)는 좌우 및 전후 대칭으로 배치된 횡요 및 중요 감쇠 챔버의 어느 한쪽 내부 수선면 S_C^l ($l=2,3$)의 면적이며 γ^l ($l=1,2,3$)은 다음과 같은 무차원량이다.

$$\gamma^l = \frac{i\omega \delta^l}{\rho g}, \quad l=1,2,3 \quad (17)$$

위에서 δ^l 은 실험적으로 결정되어야 할 인자로서 각 챔버의 덕트를 기압의 불연속면으로 모델링할 경우 개입되는 변수이다. q_k^l 및 Q_k^l 는 각각 ϕ_k 및 ϕ_k^l 에 기인한 유동이 주 챔버 상부덕트 S_d^l 을 통과하는 평균속도이고 q_k^l ($l=2,3$) 및 Q_k^l ($l=2,3$)는 각각 ϕ_k 및 ϕ_k^l ($l=2,3$)에 기인한 유동이 좌우 및 전후 대칭으로 배치된 횡요 및 중요 감쇠챔버 상부 덕트의 어느 한 쪽 S_d^l ($l=2,3$)를 통과하는 평균속도이다.

$$q_k^l = \frac{1}{A_d^l} \int_{S_c^l} \frac{\partial \phi_k^l}{\partial z} ds, \quad k=0,3,4,5,7 \text{ and } l=1,2,3 \quad (18)$$

$$Q_k^l = \frac{1}{A_d^l} \int_{S_c^l} \frac{\partial \phi_k^l}{\partial z} ds, \quad k=3,4,5,7 \text{ and } l=1,2,3 \quad (19)$$

한편 횡요 및 중요 감쇠챔버 상부 덕트의 다른 한쪽 S_d^l ($l=2,3$)를 통과하는 평균속도 중 입사파 및 산란파에 기인한 평균속도를 다음과 같이 나타내기로 한다.

$$q_k^l = \frac{1}{A_d^l} \int_{S_c^l} \frac{\partial \phi_k^l}{\partial z} ds, \quad k=0,7 ; l=2,3 \quad (18a)$$

$$Q_k^l = \frac{1}{A_d^l} \int_{S_c^l} \frac{\partial \phi_k^l}{\partial z} ds, \quad l=2,3 \quad (19a)$$

변동압력면에 기인한 속도포텐셜도 무한원방 방사조건을 만족시키며 자신이 관련된 챔버 이외에서의 자유표면 경계조건은 기존의 방사-산란파 포텐셜과 동일하다.

$$\begin{aligned} (-k_0 + \frac{\partial}{\partial z}) \phi_k^l &= 0 \text{ for } l=1,2,3; \\ k &= 3,4,5,7 \text{ on } F_0^e \cup F_0^m \cup F_0^n, (m,n) \neq l \end{aligned} \quad (20)$$

그러나 챔버 1,2,3의 내부 자유표면 F_0^1, F_0^2, F_0^3 및 접수면에서는 각각 다음과 같은 경계조건을 만족시킨다.

$$\begin{aligned} (-k_0 + \frac{\partial}{\partial z}) \phi_k^l &= 1 \text{ for } l=1,2,3 \\ \text{and } k &= 3,4,5,7 \text{ on } F_0^l \end{aligned} \quad (21)$$

$$\frac{\partial \phi_k^l}{\partial n_0} = 0 \text{ for } l=1,2,3 \text{ and } k=3,4,5,7 \text{ on } S_0 \quad (22)$$

3. 적분방정식에 의한 포텐셜 해법

부유식 OWC 챔버구조물의 주 챔버와 횡요 및 중요 감쇠챔버의 하부에 각각 수학적 경계면 S_C^l ($l=1,2,3$)를 두어 이 안쪽을 내부영역 $D^l = D^1 \cup D^2 \cup D^3$, 바깥쪽을 외부영역 D^e 라 한다. 포텐셜 ϕ_k ($k=1,2,\dots,7$) 및 ϕ_k^l ($k=3,4,5,7$ and $l=1,2,3$) 중의 하나를 편의상 ϕ_A 라하고 내부영역 D^l 에 걸쳐 이것과 Rankine-type Green함수 G_o 에 Green정리를 적용하면 다음과 같은 Green적분방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{\phi_A(P)}{2} &= \int \int_{S^{US,UF_0^i}} \phi_A(M) \frac{\partial G_o(P,M)}{\partial n_M} ds \\ &= - \int \int_{S^{US,UF_0^i}} \frac{\partial \phi_A(M)}{\partial n_M} G_o(P,M) ds, \end{aligned} \quad (23)$$

P on $S^i US_C UF_0^i$

위에서 \vec{n}_M 은 M 에 위치한 법선 벡터로서 유체 영역에서 구조물 내부로 향하며

$$G_o(P, M) = -\frac{1}{4\pi} \left\{ \frac{1}{r(P, M)} \right\} \quad (24)$$

$$r(P, M) = \frac{1}{[(x_P - x_M)^2 + (y_P - y_M)^2 + (z_P - z_M)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (25)$$

접수면 S_0 를 챔버 외부 S_0^e 와 내부 S_0^i 로 구분할 때 S_0^i 는 주 챔버와 횡요 및 종요 감쇠챔버 내부에 위치한 접수면의 합 $S_0^i = S_0^1 \cup S_0^2 \cup S_0^3$ 이고 외부영역 D^e 와 내부영역 D^i 사이의 경계면은 $S_c = S_c^1 \cup S_c^2 \cup S_c^3$ 이다.

한편 $\phi_k (k=1, 2, \dots, 7)$ 와 $\phi'_k (k=3, 4, 5, 7 \text{ and } l=1, 2, 3)$ 에 대한 자유표면 경계조건 (10), (20) 및 (21)식을 (23)식에 대입하고 정리하면 (26) 및 (27)식을 구할 수 있고 다시 포텐셜 $\phi'_k (k=3, 4, 5, 7 \text{ and } l=1, 2, 3)$ 및 $\phi_k (k=1, 2, \dots, 7)$ 중의 하나인 ϕ_A 에 대하여 외부영역 D^e 에 걸쳐 포텐셜 및 Kelvin-type Green함수 G 에 Green정리를 적용하여 정리하면 (28)식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{\phi_k(P)}{2} & - \int \int_{S \cup S_c} \phi_k(M) \frac{\partial G_o(P, M)}{\partial n_M} ds \\ & - \int \int_{F_0^i} [\phi_k(M) \frac{\partial G_o(P, M)}{\partial n_M} \\ & - k_0 \phi_k(M) G_o(P, M)] ds \\ & + \int \int_{S_c} \frac{\partial \phi_k(M)}{\partial n_M} G_o(P, M) ds \\ & = - \int \int_{S^i} \frac{\partial \phi_k(M)}{\partial n_M} G_o(P, M) ds, \\ & P \text{ on } S^i \cup S_c \cup F_0^i \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \frac{\phi'_k(P)}{2} & - \int \int_{S \cup S_c} \phi'_k(M) \frac{\partial G_o(P, M)}{\partial n_M} ds \\ & - \int \int_{F_0^i} [\phi'_k(M) \frac{\partial G_o(P, M)}{\partial n_M} \\ & - k_0 \phi'_k(M) G_o(P, M)] ds \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} & + \int \int_{S_c} \frac{\partial \phi'_k(M)}{\partial n_M} G_o(P, M) ds \\ & = - \int \int_{F_0^i} G_o(P, M) ds \quad P \text{ on } S^i \cup S_c \cup F_0^i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\phi_A(P)}{2} & + \int \int_{S_0^e \cup S_c} \phi_A(M) \frac{\partial G(P, M)}{\partial n_M} ds \\ & - \int \int_C \frac{\partial \phi_A(M)}{\partial n_M} G(P, M) ds \\ & = \int \int_{S^e} \frac{\partial \phi_A(M)}{\partial n_M} G(P, M) ds, \quad P \text{ on } S_0^e \cup S_c \end{aligned} \quad (28)$$

위에서 \vec{n}_M 은 M 에 위치한 법선 벡터로서 접수면에서 유체 영역으로 향하며

$$\begin{aligned} G(P, M) & = -\frac{1}{4\pi} \left\{ \frac{1}{r(P, M)} + \frac{1}{r'(P, M)} \right. \\ & \left. + [1 - \delta(z_P - 0) \cdot \delta(z_M - 0)] H(P, M) \right\} \end{aligned} \quad (29)$$

$$r'(P, M) = \frac{1}{[(x_P - x_M)^2 + (y_P - y_M)^2 + (z_P + z_M)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} H(P, M) & = \frac{2k_0}{\pi} \text{Re} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} e^{\zeta} [J_1(\zeta) + i\pi] d\theta \\ & + 2ik_0 \text{Re} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} e^{\zeta} d\theta \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} J_1(\zeta) & = E_1(\zeta), \text{ for } \text{Im} \zeta > 0 \\ & = E_1(\zeta) - 2i\pi, \text{ for } \text{Im} \zeta < 0 \end{aligned} \quad (32)$$

$$\zeta = k_0 \{ z_P + z_M + i[(x_P - x_M) \cos \theta + (y_P - y_M) \sin \theta] \} \quad (33)$$

위에서 $E_1(\zeta)$ 는 복소 지수함수이다.

D^e 와 D^i 간의 경계면 S_c 에서의 정합조건은 다음과 같다.

$$\phi_A(P^i) = \phi_A(P^e) \quad P \text{ on } S_c \quad (34)$$

$$\frac{\partial \phi_A(P^i)}{\partial n_P} = \frac{\partial \phi_A(P^e)}{\partial n_P} \quad P \text{ on } S_c \quad (35)$$

위에서 P^e 및 P^i 는 각각 D^e 및 D^i 에 속하면서 S_c 상의 P 점으로부터 무한히 가까운 두 점을 가리킨다.

적분방정식 (26), (27), (28)을 정합조건 (34), (35)과 연결하여 이산화하면 내, 외부영역이 연성된 선형 대수방정식으로 변환되어 풀릴 수 있다.

4. 운동방정식

접수면에 작용하는 변동 수압은 선형 비정상 포텐셜 유동에 베르누이 방정식을 적용하여 구한다.

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \rho \omega \text{Re} \{ i \Psi e^{-i\omega t} \} \quad (36)$$

이로부터 입사파 및 산란파 포텐셜에 기인한 기진력, 방사파 포텐셜에 기인한 부가질량 및 파 감쇠력 등이 구하여지며 이 과정은 잘 알려져있다. 그러나 OWC 챔버구조물의 경우에는 챔버상부의 변동 기압이 챔버 내부면에 작용하므로 추가적인 힘 및 모멘트가 발생한다.

$$p_C^l = \delta \times U_d^l \quad \text{for } l=1,2,3 \quad (37)$$

위에서 $p_C = \text{Re}\{p_C e^{-i\omega t}\}$ 이다.

여기서 각 챔버별로 덕트를 통과하는 기류의 평균속도 $U_d^l (l=1,2,3)$ 를 (A11)식을 윗첨자 ($l=1,2,3$) 으로 표시된 3 개의 챔버에 대하여 적용하여 구할 수 있다.

$$U_d^l = \sum_{k=0,3,4,5,7} u_k^l \quad \text{for } l=1,2,3 \quad (38)$$

주 챔버 ($l=1$) 의 경우

$$u^1 = q_0^1 + q_7^1 + C_7^1 Q_7^1 - i\omega \sum_{k=3}^5 a_k (q_k^1 + C_k^1 Q_k^1) \quad (39)$$

$$q_3^1 = q_3^1 - A_C^1 / A_d^1 \quad (40)$$

$$q_4^1 = q_4^1 - \frac{1}{A_d^1} \int_{A_c^1} y ds \quad (41)$$

$$q_5^1 = q_5^1 + \frac{1}{A_d^1} \int_{A_c^1} x ds \quad (42)$$

수직면 ($y0z$) 및 ($z0x$) 가 물체의 대칭면이고 이 두 면이 만나는 선이 z 축이므로 부유체의 회전중심을 z 축 상에 취하면 주 챔버 덕트에서는 횡요와 종요에 의한 q_4^1 와 q_5^1 는 없고 상하동요에 의한 기류 q_3^1 만이 발생한다.

$$u^1 = q_0^1 + q_7^1 + C_7^1 Q_7^1 - i\omega (q_3^1 + C_3^1 Q_3^1) \quad (43)$$

또한 ψ_3^1 및 ψ_7^1 에 대한 경계조건이 같으므로 $\psi^1 = \psi_3^1 = \psi_7^1$ 이고 $Q^1 = Q_3^1 = Q_7^1$ 이다.

이상으로부터 변동 기압에 기인한 z 방향 힘 F_3^1 을 얻을 수 있다.

$$F_3^1 = -\rho g \gamma^1 a_3 N_{33}^1 + E_3^1 \quad (44)$$

$$N_{33}^1 = (q_3^1 + C_3^1 Q^1) A_C^1 \quad (45)$$

$$E_3^1 = \delta^1 (q_0^1 + q_7^1 + C_7^1 Q^1) A_C^1 \quad (46)$$

수평방향 모멘트는 대칭조건에 의하여 상쇄된다.

유사한 과정에 의하여 횡요 및 종요 감쇠챔버 내부면에 작용하는 z 방향 힘 $F_3^l (l=2,3)$ 과 x 및 y 방향 모멘트 M_1^l 및 M_2^l 가 다음과 같이 구하여진다.

$$F_3^l = -\rho g \gamma^l a_3 N_{33}^l + E_3^l, \quad l=2,3 \quad (47)$$

$$N_{33}^l = 2(q_3^l + C_3^l Q_3^l) A_C^l, \quad l=2,3 \quad (48)$$

$$E_3^l = \delta^l A_C^l [q_0^l + q_7^l + C_7^l (Q_7^l + Q_7^l) + q_0^l + q_7^l], \quad l=2,3 \quad (49)$$

$$M_1^2 = -\rho g \gamma^2 a_4 N_{44}^2 + E_4^2 \quad (50)$$

$$N_{44}^2 = 2(q_4^2 + C_4^2 Q_4^2) \int_{S_2} y ds \quad (51)$$

$$E_4^2 = \delta^2 [q_0^2 + q_7^2 + C_7^2 (Q_7^2 - Q_7^2) - q_0^2 - q_7^2] \int_{S_2} y ds \quad (52)$$

$$M_2^3 = -\rho g \gamma^3 a_5 N_{55}^3 + E_5^3 \quad (53)$$

$$N_{55}^3 = -2(q_5^3 + C_5^3 Q_5^3) \int_{S_3} x ds \quad (54)$$

$$E_5^3 = -\delta^3 [q_0^3 + q_7^3 + C_7^3 (Q_7^3 - Q_7^3) - q_0^3 - q_7^3] \int_{S_3} x ds \quad (55)$$

아울러 3개의 챔버 내부 자유표면 변동압력면에 기인한 속도포텐셜에 의한 변동수압은 $p^l, (l=1,2,3)$ 은 다음과 같이 표시된다.

$$p^1 = i\rho\omega (-i\omega a_3 C_3^1 \psi^1 + C_7^1 \psi^1) \quad (56)$$

$$p^2 = i\rho\omega [C_7^2 \psi_7^2 - i\omega (a_3 C_3^2 \psi_3^2 + a_4 C_4^2 \psi_4^2)] \quad (57)$$

$$p^3 = i\rho\omega [C_7^3 \psi_7^3 - i\omega (a_3 C_3^3 \psi_3^3 + a_5 C_5^3 \psi_5^3)] \quad (58)$$

이를 점수면에 걸쳐 적분하여 정리하면 결국 다음과 같은 힘 및 모멘트 $L_j (j=1, ,6)$ 를 얻게된다.

$$L_j = \sum_{k=1}^6 H_{jk} a_k + K_j \quad (59)$$

위에서 $K_j (j=1, ,6)$ 와 원래 0이거나 운동 모드 및 감쇠 챔버들의 진후 및 좌우 대칭조건에 의하여 상쇄된 계수 등을 제외한 0이 아닌 $H_{jk} (j=1, ,5 \text{ and } k=3,4,5)$ 는 다음과 같다.

$$K_j = -i\rho\omega \sum_{l=1}^3 C_7^l \int_{S_0} \psi_7^l (\vec{e}_j \cdot \vec{n}_0) ds, \quad j=1,2,3 \quad (60)$$

$$K_j = -i\rho\omega \sum_{l=1}^3 C_l^j \int_{S_0} \phi_l^j \vec{e}_{j-3} \cdot (\vec{OM} \times \vec{n}_0) ds, \quad (61)$$

$$j=4,5,6$$

$$H_{33} = -\rho\omega^2 \sum_{l=1}^3 C_3^l \int_{S_0} \phi_3^l (\vec{e}_3 \cdot \vec{n}_0) ds \quad (62)$$

$$H_{24} = -\rho\omega^2 C_4^2 \int_{S_0} \phi_4^2 (\vec{e}_2 \cdot \vec{n}_0) ds \quad (63)$$

$$H_{44} = -\rho\omega^2 C_4^2 \int_{S_0} \phi_4^2 \vec{e}_1 \cdot (\vec{OM} \times \vec{n}_0) ds \quad (64)$$

$$H_{15} = -\rho\omega^2 C_5^3 \int_{S_0} \phi_5^3 (\vec{e}_1 \cdot \vec{n}_0) ds \quad (65)$$

$$H_{55} = -\rho\omega^2 C_5^3 \int_{S_0} \phi_5^3 \vec{e}_2 \cdot (\vec{OM} \times \vec{n}_0) ds \quad (66)$$

통상적인 부유구조물에 작용하는 힘 및 모멘트의 평형조건식에 OWC 챔버에 기인한 외력을 더하여 정리하면 다음과 같은 주파수 영역 운동방정식을 얻는다.

$$\sum_{jk=1}^6 [-\omega^2(mI_{jk} + \rho\Delta M_{jk}) - i\rho\Delta\omega^2 B_{jk} + \rho g D^2 R_{jk} + N_{jk}^C] a_j = \rho a_0 \omega^2 D^3 F_j + F_j^C, j=1, \dots, 6 \quad (67)$$

위에서 $m, \Delta, I_{jk}, R_{jk}, M_{jk}, B_{jk}$ 및 F_j 는 각각 통상적인 부유구조물의 질량, 배수용적, 관성계수, 복원력계수, 부가질량계수, 파 감쇠계수 및 파 기진력계수로서 잘 알려져 있으며 D 는 구조물의 특성길이이다.

0이 아닌 N_{jk}^C 및 F_j^C 는 다음과 같다.

$$N_{33}^C = \rho g \sum_{l=1}^3 \gamma^l N_{33}^l - H_{33} \quad (68)$$

$$N_{44}^C = [\rho g \gamma^2 N_{44}^2 - H_{44}] / D \quad (69)$$

$$N_{55}^C = [\rho g \gamma^3 N_{55}^3 - H_{55}] / D \quad (70)$$

$$N_{15}^C = -H_{15} \quad (71)$$

$$N_{24}^C = -H_{24} \quad (72)$$

$$F_j^C = K_j, j=1, 2 \quad (73)$$

$$F_6^C = K_6 / D \quad (74)$$

$$F_3^C = K_3 + \sum_{l=1}^3 E_3^l \quad (75)$$

$$F_4^C = [K_4 + E_4^2] / D \quad (76)$$

$$F_5^C = [K_5 + E_5^3] / D \quad (77)$$

5. 수치 실험

Fig. 1에 보인 바와 같은 부유식 OWC 챔버 구조물을 수치모델로 취하였으며 이 챔버의 주요 제원은 다음과 같다.

Table 1 Principal dimensions

OWC	Outer dia.	Inner dia.
	13 m	10 m
홀수 $T = 7.5$ m ;		
회전중심 $x_O = 0$ m, $y_O = 0$ m, $z_O = -2.7$ m		
부심 $x_B = 0$ m, $y_B = 0$ m, $z_B = -3.75$ m		
무계중심 $x_C = 0$ m, $y_C = 0$ m, $z_C = -2.7$ m		
회전중심을 기준한 횡요 관성반경 $R_y \approx 4.2$ m		
회전중심을 기준한 종요 관성반경 $R_\rho \approx 4.2$ m		
회전중심을 기준한 선수요 관성반경 $R_\gamma \approx 4.2$ m		

특성길이 D 는 외경길이 13 m 로 취하였고 파의 입사각이 90도인 경우에 파장/특성길이 L/D 가 0.25에서 30 까지 0.25간격으로 계산이 수행되었다. 각 챔버의 덕트를 기압의 불연속면으로 모델링할 경우 개입되는 변수 δ^l ($l=1, 2, 3$)은 0, 40, 80, 120의 4개 값을 주었다. 주챔버의 δ^1 값이 0 및 40인 경우에 대한 OWC 구조물의 상하동요 복소 진폭비 $A_3 = |a_3/a_0|$ 가 Fig. 2 및 Fig. 3에 각각 표시되었다. 주 챔버의 δ^1 값이 증가함에 따라 상하동요 응답이 급격히 감소함을 알 수 있다. 반면에 δ^1 값이 고정되었을 때 횡요 감쇠챔버의 δ^2 값이 구조물의 상하동요에 미치는 영향은 작는데 그 이유는 감쇠챔버의 크기가 주 챔버보다 상당히 작기 때문이다.

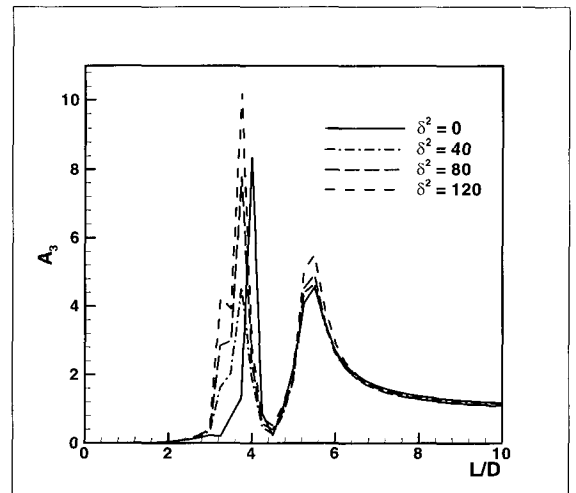


Fig. 2 Heave amplitude ratio with $\delta^1 = 0$

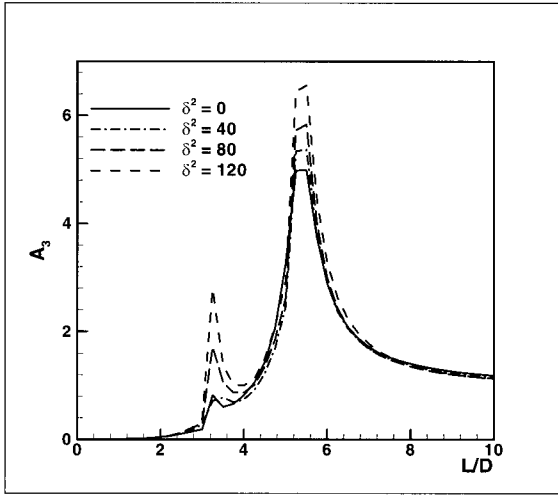


Fig. 3 Heave amplitude ratio with $\delta^1 = 40$

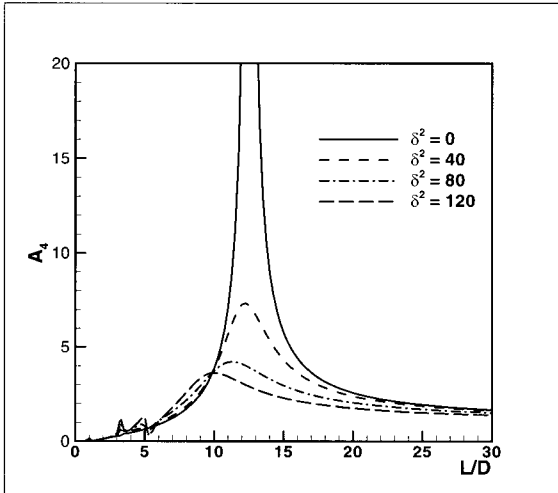


Fig. 4 Roll amplitude ratio

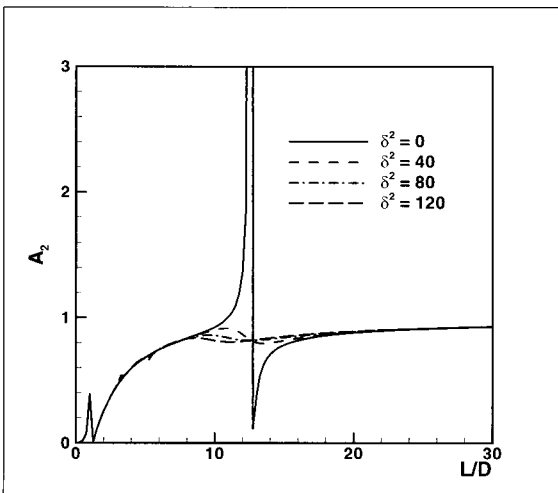


Fig. 5 Sway amplitude ratio

Fig. 4에 입사파의 기울기로 무차원화된 횡요 복소진폭비 $A_4 = |a_4 / (a_0 k_0)|$ 가 표시되었다. 횡요응답은 주 챔버와는 무관하다. 공진은 $L/D \approx 13$ 에서 발생함을 알 수 있고 이때 δ^2 값이 증가함에 따라 공진진폭이 급격히 감소함을 알 수 있다.

Fig. 5에 좌우동요 복소진폭비 $A_2 = |a_2 / a_0|$ 가 표시되었다. 좌우동요가 횡요와 연성되었으므로 횡요 공진점에서 진폭이 크며 역시 δ^2 값이 증가함에 따라 진폭이 급격히 감소함을 알 수 있다.

6. 결 론

선형과 이론에 근거한 부유체 운동해석기법에 자유표면 변동압력면 이론을 도입하여 부유식 OWC 챔버의 파중 운동 해석기법을 개발하였다. 이 결과는 anti-rolling tank 및 SES 운동제어 등에 활용될 수 있다. 실험치와의 비교가 곧 수행될 예정이다.

후 기

본 논문은 해양수산부가 지원하는 한·인도 해양에너지 개발 공동연구과제 결과의 일부임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

홍도천, 홍사영, 이상무 (1987). "대형 해양구조물에 작용하는 파랑 하중에 관하여", 한국해양공학회지, 제1권 제1호, pp 33-38.
 홍도천, 김현주 (2000). "Hybrid적분방정식을 사용한 Flap - Harbour 복합체 파 에너지 흡수효율추정", 한국해양공학회지, 제14권 제2호, pp 1-6.
 Budal, K. and Falnes J. (1975). "A resonant point absorber of ocean-wave power", Nature, Vol 256, pp 478-479: Corrigendum Vol 257, p 626.
 Evans, D.V. (1976). "A theory for wave-power absorption by oscillating bodies", J. of Fluid Mech. Vol 77, pp 1-25.
 Falcão, A.F.de O. and Sarmento, A.J.N.A. (1980). "Wave generation by a periodic surface pressure and its application in wave-energy extraction", 15th Int. Cong. Theo. Appl. Mech., Toronto.
 Falnes, J. and McIver, P. (1985). "Surface wave interactions with systems of oscillating bodies and pressure distributions", Applied Ocean Research, Vol 7, No 4, pp 225-234.
 Guevel, P. and Hong, D.C. (1982). "Considerations sur le fonctionnement des houlomoteur du type oscillant", Bulletin de l'ATMA, Paris.
 Hong, S.Y., Hong, S.W., Kim, J.W., Um, Y.C. and Hong, D.C. (1995). "Development of an electrical power plant from ocean wave energy", 2nd European Wave Power Conference, Lisbon, pp297-304.
 Newman J.N. (1976). "The interaction of stationary vessels with regular waves", Proc. 11th Symp. Naval Hydrodynamics

London, pp 491-501.

Ogilvie T.F. (1969). "Oscillating pressure fields on a free surface", Univ. Michigan, College of Eng. Report No 030.

부 록

외부 대기압을 0이라 하고 덕트를 통과하는 수직 상방향 기류의 유속을 U_d 라 할 때 덕트를 기압 증감의 불연속면 S_d 로 가정하면 공기실 내부 압력 p_c 와 U_d 를 다음과 같이 관계지을 수 있다.

$$0 - p_c = -\delta \times U_d \quad (A1)$$

여기서 δ 는 실험에 의하여 결정되는 인자이다.

챔버 내부 공기의 압축성이 무시할 정도이고 자유표면의 운동이 미소량일 경우 동력학적 선형 자유표면조건은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$-\rho \left(\frac{\partial \Phi^C}{\partial t} + g \zeta^C \right) = p_c \quad \text{on } F_0^C \quad (A2)$$

여기서 F_0^C 는 평균위치에 있는 챔버 내부 자유표면으로서 외부 정수면 F_0^e 와 동일하게 $z=0$ 인 수평면이고 Φ^C 는 챔버 내부기압 p_c 에 기인한 자유표면 변동압력면(free surface oscillating pressure patch)에 의하여 수중에 유기된 속도포텐셜이며 ζ^C 는 Φ^C 에 기인한 자유표면의 수직방향 변위이다.

(A1)에서 OWC 챔버구조물이 부유체인 경우, U_d 는 입사파 Ψ_0 및 챔버구조물의 6자유도 운동에 의하여 유기되는 속도포텐셜의 총합 Φ 로부터 구하여야 한다.

$$\Phi = \text{Re}\{[\Psi_0 + \Psi_7 + \Psi_R]e^{-i\omega t}\} \quad (A3)$$

$$\Psi_R = -i\omega \left\{ \sum_{k=1,2,6} a_k \phi_k + \sum_{k=3,4,5} a_k [\phi_k + C_k \phi_k^C] \right\} \quad (A4)$$

$$\Psi_7 = \phi_7 + C_7 \phi_7^C \quad (A5)$$

위에서 C_k ($k=3,4,5,7$)은 Φ 에 대한 F_0^C 에서의 자유표면 경계조건으로부터 결정될 량이다.

U_d 는 내부 자유표면을 통과하는 물의 유량과 덕트를 통과하는 공기의 유량이 같으므로 다음 식으로 표시된다.

$$U_d = \frac{1}{A_d} \int_{S_c} [\zeta - \vec{D} \cdot \vec{e}_3] ds \quad (A6)$$

위에서 A_d 는 S_d 의 단면적이고 \vec{D} 는 평균위치가 F_0^C 와 일치하는 내부 수선면 S_c 의 운동변위이다. 즉 $\zeta - \vec{D} \cdot \vec{e}_3$ 는 챔버구

조물에서 본 수직방향 상대유속이 된다. 그리고 ζ 는 총합 포텐셜 Φ 에 기인한 자유표면의 수직방향 변위로서 Φ 에 대한 기하학적 선형 자유표면조건으로부터 구할 수 있다.

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial z} + \zeta = 0 \quad \text{on } F_0^C \quad (A7)$$

한편

$$\Phi^C = \text{Re}\{\Psi^C e^{-i\omega t}\} \quad (A8)$$

와 같이 표시하면 (A4),(A5)로부터 Ψ^C 가 다음과 같음을 알 수 있다.

$$\Psi^C = -i\omega \sum_{k=3,4,5} a_k C_k \phi_k^C + C_7 \phi_7^C \quad (A9)$$

여기서

$$U_d = \text{Re}\{U_d e^{-i\omega t}\} ; \dot{U}_d = \text{Re}\{-i\omega U_d e^{-i\omega t}\} \quad (A10)$$

로 표시하고 (A6)에 (A3)-(A5) 및 (A7)식을 대입, 정리하면 다음식을 얻는다.

$$\begin{aligned} U_d = & \frac{1}{A_d} \int_{S_c} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} (\Psi_0 + \phi_7 + C_7 \phi_7^C) \right. \\ & - i\omega \left[a_3 \left(\frac{\partial(\phi_3 + C_3 \phi_3^C)}{\partial z} - 1 \right) \right. \\ & + a_4 \left(\frac{\partial(\phi_4 + C_4 \phi_4^C)}{\partial z} - y \right) \\ & \left. \left. + a_5 \left(\frac{\partial(\phi_5 + C_5 \phi_5^C)}{\partial z} + x \right) \right] \right\} ds \end{aligned} \quad (A11)$$

한편 Φ 중에서 Φ^C 를 제외한 부분은 다음과 같은 동력학적 선형 자유표면조건을 만족시킨다.

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + g \frac{\partial}{\partial z} \right) (\Phi - \Phi^C) = 0, \quad \text{on } F_0^C \quad (A12)$$

(A12)식을 시간미분하고 (A3)-(A5) 및 (A7)식을 대입, 정리하면 ϕ_k ($k=1, \dots, 7$)에 대한 F_0^C 에서의 경계조건을 얻는다.

$$\left(-k_0 + \frac{\partial}{\partial z} \right) \phi_k = 0 \quad \text{for } k=1, \dots, 7 \quad \text{on } F_0^C \quad (A13)$$

(A2)식을 시간미분하고 위에 나온 관계식들을 대입, 정리하면 ϕ_k^C ($k=3,4,5,7$)에 대한 F_0^C 에서의 경계조건

$$\left(-k_0 + \frac{\partial}{\partial z} \right) \phi_k^C = 1 \quad \text{for } k=3,4,5,7 \quad \text{on } F_0^C \quad (A14)$$

및 C_k ($k=3,4,5,7$)가 구하여 진다.

$$C_3 = \frac{\gamma(q_3 - A_c/A_d)}{(1 - \gamma Q_3)}$$

$$(A15) \quad q_k = \frac{1}{A_d} \int_{A_c} \frac{\partial \psi_k}{\partial z} ds, \quad k=0,3,4,5,7 \quad (A19)$$

$$C_4 = \frac{\gamma(q_4 - \frac{1}{A_d} \int_{A_c} y ds)}{(1 - \gamma Q_4)}$$

$$(A16) \quad Q_k = \frac{1}{A_d} \int_{A_c} \frac{\partial \psi_k^C}{\partial z} ds, \quad k=3,4,5,7 \quad (A20)$$

$$C_5 = \frac{\gamma(q_5 + \frac{1}{A_d} \int_{A_c} x ds)}{(1 - \gamma Q_5)}$$

(A17)

한편 ψ_k^C ($k=3,4,5,7$)에 대한 부유식 OWC 챔버 외부의 자유표면 F_0^e 및 부유구조물의 접수면 S_0 에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$C_7 = \frac{\gamma(q_0 + q_7)}{(1 - \gamma Q_7)}$$

(A18)

$$(-k_0 + \frac{\partial}{\partial z})\psi_k^C = 0, \quad k=3,4,5,7 \quad \text{on } F_0^e \quad (A21)$$

$$\frac{\partial \psi_k^C}{\partial n_0} = 0, \quad k=3,4,5,7 \quad \text{on } S_0 \quad (A22)$$

여기서 A_c 는 S_c 의 단면적이고 $\gamma = \frac{i\omega \delta}{\rho g}$ 는 무차원량이며 q_k

및 Q_k 는 각각 ψ_k 및 ψ_k^C 에 기인한 유동이 S_d 를 통과하는 평균 속도이다.

2002년 1월 14일 원고 접수

2002년 4월 15일 최종 수정본 채택